



**ANALISA KEANDALAN PROTEKSI KEBAKARAN DAN LEDAKAN ANJUNGAN
LEPAS PANTAI MAHAKAM YANG TERINTEGRASI DENGAN *EMERGENCY
SHUTDOWN SYSTEM***

Oleh

Ervandi Ary Rahmadhani¹, Habir², Benny Mochtar³

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945 Samarinda

Email: ¹ervandiarv@gmail.com, ²habir_habir@yahoo.co.id, ³bennymochtar18@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze the influence of tourist attractions, facilities, and promotions on the number of tourists visiting Celosia Flower Park. The selection of this topic is based on the importance of the role of the destination as one of the main attractions in its area, but faces challenges in maintaining the consistency of the number of tourist visits. The method used is quantitative with a survey approach, using a questionnaire as an instrument for data collection. The sample consisted of visitors to Celosia Flower Park, and the data was analyzed using multiple linear regression techniques using SPSS software. The results showed that the three independent variables of tourist attractions, facilities, and promotions had a significant effect both simultaneously and partially on the number of tourist visits. Promotion proved to be the most dominant factor, followed by attractions and facilities. The R Square value of 0.653 indicates that the model can explain 65.3% of the variation in the number of tourists. These results emphasize the importance of an effective promotion strategy, supported by the development of attractions and improvement of facilities, in order to increase the competitiveness of tourist destinations. This study provides an empirical contribution for tourism managers in designing data-based policies to increase visits sustainably.

Keywords: Offshore Safety 1, Fire and Gas Detection 2, Emergency Shutdown System (ESS) 3

PENDAHULUAN

Anjungan lepas pantai memegang peran penting dalam kegiatan ekstraksi dan pengolahan minyak dan gas bumi, namun beroperasi di lingkungan ekstrem yang sarat risiko, seperti badai, gelombang tinggi, serta potensi kebocoran gas dan hidrokarbon yang dapat memicu kebakaran dan ledakan. Risiko-risiko ini tidak hanya mengancam keselamatan personel dan integritas infrastruktur, tetapi juga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan (Istiadji et al., 2017; Khan & Imran, 2018). Salah satu elemen kunci dalam upaya mitigasi risiko tersebut adalah sistem proteksi kebakaran dan ledakan yang terintegrasi dengan Emergency Shutdown System (ESS). Keandalan sistem ini sangat krusial, mengingat kegagalan dalam deteksi

maupun respons awal dapat berujung pada konsekuensi fatal. Walaupun teknologi deteksi dan pemadaman terus mengalami perkembangan, berbagai kendala seperti keterlambatan respons, tingkat akurasi yang rendah, serta integrasi sistem yang belum optimal masih kerap ditemukan di lapangan. Kondisi ini memunculkan kebutuhan untuk mengkaji lebih lanjut indikator utama sistem, tingkat keandalannya dalam operasi, serta efektivitas implementasinya dalam kondisi nyata.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi indikator kinerja sistem proteksi kebakaran dan ledakan, mengevaluasi tingkat keandalannya pada anjungan lepas pantai yang telah beroperasi lebih dari 15 tahun,



serta menentukan sistem yang paling efektif berdasarkan performa aktual di lapangan. Studi ini bersifat analitis dan evaluatif, dengan pendekatan berbasis observasi lapangan, wawancara terstruktur, dan telaah dokumentasi teknis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya referensi dalam bidang keselamatan industri migas lepas pantai, sekaligus memberikan dasar bagi penguatan sistem proteksi yang lebih adaptif dan andal untuk mendukung operasional jangka panjang. Dengan demikian, keselamatan aset, pekerja, dan lingkungan dapat terjamin di tengah kompleksitas dan dinamika kondisi operasi offshore.

METODE PENELITIAN

Gambar 3.1 menggambarkan alur sistematis dari proses penelitian yang dimulai dengan identifikasi permasalahan dan penentuan tujuan penelitian, dilanjutkan dengan pengumpulan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara terstruktur dengan personel teknis, dan survei lokasi anjungan, sementara data sekunder meliputi dokumen teknis sistem proteksi, laporan keselamatan kerja, serta manual operasional ESS dan peralatan deteksi. Tahap selanjutnya adalah analisis dan evaluasi keandalan sistem, yang dilakukan dengan membandingkan performa aktual sistem deteksi gas, deteksi api, sistem pemadam otomatis, serta Blowdown Depressurizing Valve (BDV) terhadap standar operasional dan desain. Evaluasi ini juga mencakup pengukuran tingkat keandalan pada masing-masing anjungan (A, B, dan C) berdasarkan kriteria efektivitas, akurasi, dan responsivitas sistem. Proses akhir melibatkan penarikan kesimpulan dan saran teknis, terutama untuk peningkatan sistem proteksi kebakaran dan ledakan jangka panjang yang adaptif terhadap dinamika operasi offshore. Setiap tahapan dalam rancangan penelitian ini dilakukan secara terstruktur untuk menjamin

validitas hasil dan relevansi terhadap konteks industri migas lepas pantai :



Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada anjungan minyak dan gas yang terletak di Kecamatan Anggana, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Anjungan Mahakam dengan koordinat geografis 0°12'43" LS dan 117°34'43" BT. Lokasi ini berfungsi sebagai fasilitas vital dalam proses pengolahan gas dan minyak bumi, dikelilingi oleh jaringan sumur produksi, pipa penyalur, serta infrastruktur pendukung lainnya. Wilayah ini berada dalam lingkungan geografis yang kompleks dan dinamis, terdiri atas lahan rawa, daerah pasang surut, tanah gambut, dan vegetasi mangrove yang padat. Kondisi geografis ini memberikan tantangan tersendiri dalam perancangan dan operasional infrastruktur anjungan.

Wilayah pesisir tempat anjungan berada menghadap Laut Sulawesi dan terpengaruh oleh arus laut serta sedimentasi tinggi, yang memerlukan desain struktur anjungan tahan terhadap pasang surut, abrasi, dan tanah lunak khas delta. Kondisi ini mempengaruhi perencanaan teknis dan fondasi yang disesuaikan dengan geoteknik dan hidrodinamika lokal. Wilayah Mahakam dikenal dengan produktivitas gas alam yang



tinggi dan keanekaragaman hayati lahan basah, dengan akses terbatas hanya melalui transportasi air, yang menuntut koordinasi logistik efisien. Operasional anjungan mengandalkan teknologi tinggi dan sistem keselamatan terpadu seperti deteksi gas, pemadam kebakaran otomatis, dan *Emergency Shutdown System* (ESS), untuk menjamin keselamatan dalam lingkungan berisiko tinggi.

Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini mencakup jenis data yang digunakan, instrumen yang diterapkan, serta teknik dan prosedur yang diikuti selama penelitian.

- **Jenis Data**

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung, wawancara dengan teknisi dan operator, serta pengamatan terhadap sistem proteksi kebakaran dan *Emergency Shutdown System* (ESS) yang diterapkan di anjungan. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari dokumen teknis, laporan operasional, serta referensi ilmiah yang berkaitan dengan standar keselamatan dan proteksi kebakaran di industri migas.

- **Instrumen Pengumpulan Data**

Instrumen yang digunakan dalam pengumpulan data meliputi observasi terhadap kondisi fasilitas, sistem deteksi kebakaran, dan pemadam kebakaran serta integrasinya dengan *Emergency Shutdown System* (ESS). Wawancara dilakukan dengan personel teknis untuk memahami prosedur keselamatan dan penanganan insiden. Survei lapangan dilakukan tanpa kuesioner untuk menggali informasi terkait praktik kerja dan kondisi sistem di lapangan. Selain itu, checklist evaluasi digunakan untuk menilai kesesuaian sistem proteksi dengan standar NFPA, API, dan prosedur internal perusahaan.

- **Teknik Pengumpulan Data**

Teknik pengumpulan data yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi observasi langsung terhadap kondisi sistem dan keterpaduannya dengan *Emergency Shutdown System* (ESS), wawancara terstruktur dengan operator dan teknisi, serta survei lapangan untuk memantau proses operasional secara langsung. Penggunaan checklist evaluatif juga dilakukan untuk memverifikasi fungsi dan kelengkapan sistem proteksi berdasarkan standar yang berlaku.

Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif-kualitatif dan evaluatif-kuantitatif untuk menilai keandalan sistem proteksi kebakaran serta keterpaduannya dengan *Emergency Shutdown System* (ESS)..

- **Analisis Kualitatif**

Pendekatan kualitatif digunakan untuk memperoleh pemahaman mendalam terhadap kondisi aktual di lapangan. Analisis mencakup interpretasi hasil observasi fisik terhadap sistem keselamatan, wawancara dengan personel teknis, serta evaluasi terhadap efektivitas *Emergency Shutdown System* (ESS) dalam merespons potensi kebakaran dan ledakan.

- **Metode Evaluatif dengan Pendekatan Kuantitatif Deskriptif**

Pendekatan ini diterapkan untuk mengevaluasi efektivitas sistem proteksi kebakaran dan ledakan serta integrasinya dengan *Emergency Shutdown System* (ESS). Penilaian dilakukan dengan menggunakan checklist teknis yang merujuk pada standar internasional seperti NFPA, API, dan ISO 13702. Evaluasi mencakup kondisi sistem deteksi api dan gas, sistem pemadaman otomatis, serta keterkaitan dan integrasi sistem tersebut dengan *Emergency Shutdown System* (ESS). Survei lapangan dilakukan tanpa menggunakan kuesioner tertulis, melainkan melalui inspeksi langsung terhadap sistem keselamatan di lokasi, yang diperkuat dengan catatan teknis dan hasil inspeksi rutin. Data historis dari laporan insiden dan aktivasi sistem

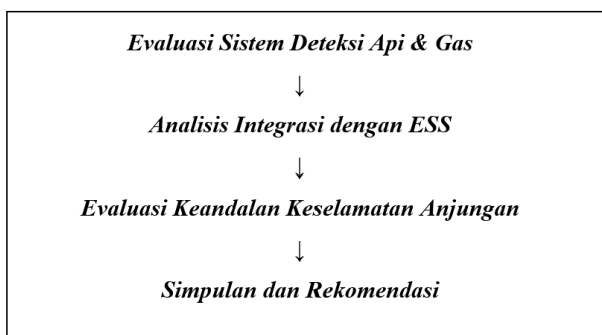


proteksi dianalisis untuk mengidentifikasi pola kegagalan maupun tingkat efektivitas sistem dalam merespons situasi darurat.

Kerangka Pikir

Penelitian ini didasarkan pada teori sistem proteksi kebakaran dan ledakan serta integrasinya dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) pada instalasi lepas pantai. Fokus utamanya adalah mengevaluasi keandalan sistem keselamatan operasional melalui pendekatan deskriptif dan evaluatif terhadap data teknis lapangan.

Sistem deteksi yang dianalisis menggunakan teknologi terkini, seperti *Det-Tronics UV/IR* untuk deteksi api dan *General Monitors Catalytic* untuk deteksi gas. Integrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) menjadi kunci dalam memastikan respons otomatis terhadap potensi bahaya. Evaluasi mencakup analisis fungsi teknis detektor, kecepatan respons, serta kondisi operasional sistem pemadaman kebakaran dan pengendalian kebocoran gas. Model kerangka pikir menggambarkan tahapan identifikasi sistem deteksi, analisis keterpaduannya dengan *Emergency Shutdown System* (ESS), serta penilaian keandalan keselamatan operasional. Hasil evaluasi digunakan untuk menilai efektivitas sistem proteksi dan memberikan rekomendasi teknis untuk peningkatan keselamatan. Alur interaksi antar sistem digambarkan dalam bentuk flowchart..



HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi keandalan sistem proteksi kebakaran dan ledakan yang terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) pada tiga anjungan lepas pantai Mahakam: Anjungan A (manifold-pemisahan), B (kompresi), dan C (terminal transit). Metode penelitian menggunakan pendekatan kualitatif (observasi dan wawancara) serta kuantitatif deskriptif (checklist teknis dan analisis data historis). Analisis dilakukan dalam tiga tahap: identifikasi indikator proteksi dan penilaian kinerja berdasarkan sub-indikator teknis, serta evaluasi keandalan terhadap standar internasional (NFPA dan API RP 14C). Hasil menunjukkan bahwa keandalan sistem dapat di tunjukkan dari analisa berikut pada setiap anjungan A, B, dan C.

4Indikator dan kinerja Sub Indikator Sistem Proteksi Kebakaran dan Ledakan

Tahap awal analisis dilakukan dengan mengidentifikasi indikator sistem proteksi kebakaran dan ledakan yang terpasang pada masing-masing anjungan lepas pantai di wilayah Mahakam. Proses ini mencakup identifikasi jenis, jumlah, dan distribusi perangkat proteksi yang mendukung keselamatan operasional, khususnya yang terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS). Informasi yang diperoleh menjadi dasar objektif dalam mengevaluasi kinerja sistem serta menilai kesesuaian konfigurasi proteksi terhadap potensi risiko di lapangan. Hasil identifikasi ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kesiapan dan kelengkapan sistem proteksi sebagai bagian dari strategi mitigasi risiko kebakaran dan ledakan pada lingkungan offshore yang berisiko tinggi.

4.1.1 Sistem Proteksi sub indikator *Blowdown Depressurisation Valve*

Blowdown Depressurisation Valve (BDV) merupakan komponen vital dalam sistem proteksi kebakaran dan ledakan pada anjungan lepas pantai. Fungsinya adalah menurunkan dan membuang tekanan fluida



secara cepat ke sistem flare saat terjadi kondisi darurat, seperti terdeteksinya api atau kebocoran gas. Peran BDV sangat penting dalam mencegah eskalasi risiko kebakaran dan ledakan, serta melindungi personel, peralatan, dan lingkungan. Selain itu, BDV juga mendukung kinerja *Emergency Shutdown System* (ESS) dengan memastikan pengosongan sistem produksi berlangsung secara terkendali. Keandalan BDV dievaluasi melalui lima indikator utama, yaitu: *time delay*, *travelling time*, *actuation failure frequency*, *passing rate*, dan *physical condition*. Penelitian ini menganalisis kinerja BDV pada Anjungan A, B, dan C yang masing-masing memiliki karakteristik operasi berbeda, guna mengevaluasi tingkat proteksi berdasarkan parameter kinerja tersebut. Identifikasi dilakukan terhadap sistem proteksi di ketiga anjungan, yang selanjutnya dijadikan dasar untuk menyusun nilai kinerja setiap sub-indikator:

Tabel: Analisis Kinerja Sistem BDV Anjungan A (10 Unit BDV)

INDIKATOR KINERJA A	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM	ANALISA KINERJA A
Time Delay	API RP 14C, NFPA 72	< 5 detik	9 dari 10 BDV memenuhi standar, 1 BDV melebihi standar yaitu 6 detik	Umumnya cepat, 1 BDV perlu evaluasi keterlambatan aktivasi.
Travelling Time	NFPA 20, API RP 14G	≤ 15 detik	10 unit BDV memenuhi standar (2–4 detik)	Sangat baik, respon cepat dan sesuai standar.
Actuation Failure Frequency	ISO 14224, IEC 61508	< 0.01 kali/tahun	10 unit BDV tidak mengalami kegagalan aktuasi (0 kali/tahun)	Sangat andal, menunjukkan keandalan operasional tinggi.
Passing Rate	API STD 521, ASME BPVC VIII	< 0.1%	9 dari 10 BDV = 0%, 1 unit BDV =	Umumnya sesuai, 1 BDV perlu

			1% (melembi ambang batas)	kalibrasi ulang untuk menurunkan tingkat kebocoran.
Physical Condition	Pemeriksaan visual (korosi/deformasi)	100% layak	Semua BDV dalam kondisi fisik layak (tidak ada korosi / deformasi signifikan)	Kondisi fisik sangat baik, tidak ditemukan kerusakan visual.

Tabel: Analisis Kinerja Sistem BDV Anjungan B (6 Unit BDV)

INDIKATOR KINERJA A	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM	ANALISA KINERJA A
Time Delay	API RP 14C, NFPA 72	< 5 detik	6 Unit BDV : 1–3 detik, memenuhi standar	Aktivasi cepat dan seluruh unit memenuhi standar
Travelling Time	NFPA 20, API RP 14G	≤ 15 detik	6 Unit BDV : 2–4 detik	Semua unit merespon cepat, sangat baik.
Actuation Failure Frequency	ISO 14224, IEC 61508	< 0.01 kali/tahun	6 Unit BDV : 0 kali/tahun	Tidak ditemukan kegagalan, sangat andal.
Passing Rate	API STD 521, ASME BPVC VIII	< 0.1%	6 Unit BDV : 0%	Tidak ada kebocoran, sangat baik dan sesuai standar
Physical Condition	Pemeriksaan visual (korosi/deformasi)	100% layak	6 Unit BDV : Layak	Kondisi fisik semua unit baik, tidak ada kerusakan atau deformasi signifikan.



Tabel: Analisis Kinerja Sistem BDV Anjungan C (3 Unit BDV)

INDIKATOR KINERJA	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM	ANALISA KINERJA
Time Delay	API RP 14C, NFPA 72	< 5 detik	3 Unit BDV : 0 detik, respon cepat	Respon sangat cepat, seluruh unit memenuhi standar
Travelling Time	NFPA 20, API RP 14G	≤ 15 detik	3 Unit BDV : 2 detik	Semua unit merespon dengan waktu yang cepat, sesuai standar.
Actuation Frequency	ISO 14224, IEC 61508	< 0.01 kali/tahun	3 Unit BDV : 0 kali/tahun	Tidak ada kegagalan aktuasinya, sangat andal.
Passing Rate	API STD 521, ASME BPVC VIII	< 0.1%	3 Unit BDV : 0%	Tidak ada kebocoran, memenuhi standar.
Physical Condition	Pemeriksaan visual (korosi/deformasi)	100% layak	3 Unit BDV : Layak	Kondisi fisik semua unit baik, tanpa kerusakan atau deformasi signifikan.

4.1.2 Sistem Proteksi sub indikator *Sprinkler dan Deluge Valve*

Sistem Sprinkler dan Deluge Valve merupakan komponen utama dalam proteksi kebakaran aktif di anjungan lepas pantai, terutama untuk mengantisipasi potensi kebakaran akibat pelepasan hidrokarbon pada area bersuhu dan bertekanan tinggi. Kedua sistem ini beroperasi secara otomatis melalui

integrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) ketika terjadi deteksi api atau kebocoran gas. Peran strategisnya terletak pada kemampuan membanjiri area yang luas secara cepat, baik melalui aktivasi otomatis maupun manual, untuk mendinginkan peralatan dan mencegah penyebaran api. Sistem ini dirancang sebagai respons awal dalam upaya meminimalkan kerusakan, menjaga integritas struktur, serta melindungi personel di lingkungan operasi berisiko tinggi. Evaluasi dilakukan untuk menilai distribusi sistem pada Anjungan A, B, dan C, yang masing-masing menunjukkan perbedaan tingkat proteksi berdasarkan karakteristik risiko. Efektivitas sistem sprinkler dan deluge dinilai melalui lima indikator teknis, yaitu tekanan aliran, kecepatan aktivasi, cakupan semprotan, ketersediaan air, dan stabilitas distribusi. Kelima indikator ini secara keseluruhan merepresentasikan tingkat keandalan sistem dalam merespons kebakaran secara cepat dan menyeluruh..

Tabel : Analisis Kinerja Sistem *Sprinkler dan Deluge Valve*– Anjungan A (2 Deluge valve & 12 Sprinklers)

INDIKATOR KINERJA	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM	ANALISA KINERJA
Tekanan Aliran Air	NFPA 20, ASME BPVC VIII	5–12 bar	9 dari 13 titik memenuhi standar	Umumnya sesuai standar; perlu peningkatan pada 4 titik dengan tekanan rendah.
Kecepatan Aktifasi	NFPA 25, API RP 14C	<10 detik	Seluruh titik aktifasi dalam 7–9 detik	Respon cepat dan sesuai; sistem ESS terintegrasi dengan baik.
Cakupan Penyemprotan	NFPA 15, NFPA 13	>9 m ² /nozzle & >40 m ² /head	10 titik efektif, 3 titik cakupan terbatas	Cakupan umumnya baik; titik pada KO Drum dan Pig Barrel perlu



				penyesuaian nozzle.
Ketersediaan Pasokan Air	NFPA 20, API RP 14C	20–100 L/s	11 titik memadai, 2 titik fluktuatif	Mayoritas memadai; pompa cadangan perlu diuji ulang untuk reliabilitas.
Stabilitas Distribusi Aliran	NFPA 25, ISO 6182	<10% variasi tekanan	12 titik stabil, 1 titik tidak stabil	Mayoritas memadai; pompa cadangan perlu diuji ulang untuk reliabilitas.

Tabel : Analisis Kinerja Sistem *Sprinkler* dan *Deluge Valve* – Anjungan B (2 *Deluge valve* & 12 *Sprinklers*)

INDIKATOR KINERJA	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM	ANALISA KINERJA
Tekanan Aliran Air	NFPA 20, ASME BPVC VIII	5–12 bar	Sebagian besar titik tekanan normal, 1 titik tercatat di bawah standar	Umumnya baik, 1 titik perlu dicek tekanan rendahnya.
Kecepatan Aktifasi	NFPA 25, API RP 14C	<10 detik	Semua titik aktif dalam 6–8 detik	Respons cepat, sesuai standar.
Cakupan Penyemprotan	NFPA 15, NFPA 13	>9 m ² /nozzle & >40 m ² /head	Semua area tertutup oleh semprotan	Cakupan baik, semua area terlindungi.
Ketersediaan Pasokan Air	NFPA 20, API RP 14C	20–100 L/s	Pasokan air stabil dan mencukupi di seluruh titik	Suplai air mencukupi, sesuai kebutuhan sistem.
Stabilitas Distribusi Aliran	NFPA 25, ISO 6182	<10% variasi tekanan	Tekanan stabil di sebagian besar titik, 4 titik menunjukkan fluktuasi >10%	Distribusi umumnya stabil, beberapa titik perlu disesuaikan.

Tabel : Analisis Kinerja Sistem *Sprinkler* dan *Deluge Valve* – Anjungan C

Anjungan C dirancang tanpa dilengkapi sistem sprinkler dan deluge valve, sehingga pengendalian risiko kebakaran sepenuhnya mengandalkan sistem proteksi lainnya yang tersedia. Sehingga dalam pengendalian kebakaran atau ledakan dengan mengandalkan kapal pemadam.

4.1.3 Sistem Proteksi sub indikator *Sistem Gas Detector*

Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem deteksi gas (*Gas Detector*) pada tiga anjungan lepas pantai melalui lima parameter teknis utama, yaitu: sensitivitas terhadap batas bawah gas mudah meledak (%LEL), waktu respon, frekuensi kalibrasi, tingkat integrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS), serta cakupan wilayah deteksi. Masing-masing parameter dibandingkan dengan standar referensi internasional yang relevan untuk menilai keandalan dan efektivitas sistem dalam mendeteksi potensi kebocoran gas secara dini. Hasil evaluasi disusun secara sistematis dalam bentuk tabel, yang berfungsi sebagai dasar dalam penilaian teknis serta sebagai acuan untuk penyusunan rekomendasi peningkatan sistem keselamatan ke depan..

Tabel : Analisis Kinerja Sistem *Gas Detector* – Anjungan A , B , C

INDIKATOR KINERJA	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM (ANJUNGAN A, B, C)	ANALISA KINERJA
Persentase Deteksi Gas (%LEL)	ISO 26142 / NFPA 72	20%–50% dari LEL metana	Semua detektor menunjukkan nilai 40% untuk ketiga anjungan	Akurat dan sesuai standar; sensitivitas sensor konsisten di semua anjungan.
Waktu Respon Detektor	ANSI/ISA 92.0.01	≤30 detik	Anjungan A: 10–12 detik Anjungan B: 6–9 detik Anjungan C: 7 detik	Semua detektor merespons sangat cepat dan di bawah ambang batas standar; menunjukkan efektivitas penanganan darurat secara real-time.
Frekuensi Kalibrasi	ISO/IEC 17025	Setiap 6 bulan	Semua detektor pada A, B, dan C dikalibrasi tepat waktu setiap 6 bulan	Perawatan berkala dilakukan secara konsisten; menjaga akurasi pembacaan detektor.
Integrasi dengan Sistem ESS	NFPA 72 Bab 23 (Interface & Control) / API RP 14C	Integrasi dua arah dengan sistem ESS	Anjungan A dan C: seluruh detektor terintegrasi baik Anjungan B: mayoritas baik, kecuali B-GD11 mengalami alarm palsu	Sistem umumnya andal, meskipun perlu perbaikan pada unit tertentu (B-GD11) untuk menghindari alarm palsu yang dapat mengganggu respon darurat.
		25–75 m ² per	Anjungan A: 60–72	Cakupan pengawas

Area Cakupan Deteksi		unit detektor	m ² Anjungan B: 35–70 m ² Anjungan C: 30–35 m ²	an area risiko gas efektif dan sesuai standar, dengan penempatan sensor yang optimal untuk melindungi zona bahaya.
----------------------	--	---------------	---	--

4.1.4 Sistem Proteksi sub indikator *Sistem Fire Detector*

Fire Detector (FD) *System* merupakan bagian penting dari sistem proteksi kebakaran aktif pada anjungan lepas pantai, berfungsi untuk mendeteksi keberadaan api, panas, atau asap secara dini di area berisiko tinggi. Sistem ini terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) guna mempercepat isolasi, evakuasi, dan pemadaman kebakaran. Jenis *Fire Detector* (FD) yang digunakan bervariasi—termasuk detektor panas, nyala api, dan asap—dengan penempatan strategis di ruang proses, dek terbuka, hingga ruang kontrol, untuk menjamin cakupan proteksi menyeluruh. Evaluasi kinerja sistem *Fire Detector* (FD) dilakukan pada tiga anjungan (A, B, dan C) dengan mempertimbangkan desain, kompleksitas fasilitas, serta distribusi perangkat. Anjungan B memiliki jumlah *Fire Detector* (FD) terbanyak karena fungsi kompresi dan kondisi sistem tertutup; anjungan A berada pada tingkat menengah, dan anjungan C paling sedikit karena sistemnya sederhana. Analisis dilakukan berdasarkan lima indikator teknis utama: Sensitivitas Deteksi, Waktu Respon, Frekuensi Kalibrasi & Pengujian, Integrasi dengan ESS, dan Cakupan Deteksi Area.

Kelima indikator ini digunakan untuk menilai efektivitas dan keandalan sistem FD dalam mendukung sistem keselamatan anjungan. Hasil observasi dan analisis tiap indikator untuk masing-masing anjungan ditampilkan pada tabel berikut.



Tabel : Analisis Kinerja Sistem Fire Detector – Anjungan A , B , C

INDIKATOR KINERJA	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM (ANJUNGAN A, B, C)	ANALISA KINERJA
Sensitivitas Deteksi	NFPA 72, IEC 60079-29	Respon ≤ 5 detik saat paparan api	Semua detektor merespons secara konsisten dan cepat di semua anjungan (A,B,C)	Sensitivitas tinggi; sistem andal mendeteksi potensi api dini
Waktu Respon Detektor	API RP 14C, SNI 03-3985	Respon maksimum 15 detik	Rata-rata respon 2–3 detik; lebih cepat dari ambang standar	Respon cepat menunjang penanganan darurat real-time
Kalibrasi & Pengetesan	SNI ISO 7240-14, OISD-116	Kalibrasi 1x per 6 bulan	Jadwal pemeliharaan konsisten tiap semester di seluruh anjungan	Menjamin akurasi deteksi dan keandalan alat
Integrasi dengan Sistem ESS	IEC 61508, API RP 14C	Otomatis terintegrasi dengan ESD	Sistem terhubung langsung dengan ESS; alarm aktif memicu isolasi dan shutdown	Integrasi efektif; mendukung otomatisasi keselamatan sistem
Cakupan Wilayah Deteksi	NFPA 72, OGP 434-03	100% area risiko tertutup terproteksi	FD tersebar merata; coverage mencakup semua ruang proses, kontrol, dan dek terbuka	Proteksi menyeluruh; meminimalkan area blind spot

4.1.5 Sistem Proteksi sub indikator *Fusible Plug* (FP)

Analisis ini mengevaluasi kinerja sistem *Fusible Plug* (FP) sebagai proteksi pasif terhadap kebakaran pada tiga anjungan. *Fusible Plug* (FP) berperan penting dalam merespons suhu ekstrem secara otomatis tanpa sistem kendali eksternal, menjadikannya solusi

proteksi terakhir pada kondisi darurat. Evaluasi dilakukan berdasarkan lima indikator teknis: titik leleh termal, tekanan kerja inisiasi, waktu respons termal, ketahanan kebocoran sebelum leleh, serta efektivitas lokasi pemasangan. Setiap parameter dianalisis untuk menilai keandalan dan kesiapsiagaan sistem dalam mendukung isolasi darurat dan pengendalian eskalasi kebakaran. Hasil pengamatan di lapangan dibandingkan dengan standar industri dan digunakan untuk menyusun tabel kinerja *Fusible Plug* (FP) pada anjungan A, B, dan C. Tabel : Analisis Kinerja Sistem *Fusible Plug* (FP) – Anjungan A , B , C

INDIKATOR KINERJA	STANDAR REFERENSI	NILAI STANDAR	HASIL OBSERVASI UMUM (ANJUNGAN A, B, C)	ANALISA KINERJA
Thermal Melt Point (Titik Leleh Termal)	NFPA 58, API RP 14C	$> 70^{\circ}\text{C}$	Anjungan A: 8 dari 10 unit sesuai Anjungan B: 3 dari 3 unit sesuai Anjungan C: 5 dari 5 unit sesuai	Sebagian besar unit memenuhi standar. Anjungan A memiliki 2 unit (A-FP8 dan A-FP10) yang berada di bawah ambang batas.
Working Pressure Initiation (Tekanan Inisiasi)	ASME BPVC Sec VIII, API STD 521	10–17 Bar (tergantung sistem)	Anjungan A: 2 dari 10 unit melebihi batas atas Anjungan B: semua dalam rentang Anjungan C: semua dalam rentang	Kinerja umumnya sesuai, namun A-FP5 (19 Bar) dan A-FP9 (20 Bar) perlu ditinjau karena melebihi standar tekanan maksimum.
Thermal Response Time (Waktu Respons Termal)	ISO 23251, NFPA 58	≤ 60 detik	Anjungan A: 9 dari 10 unit sesuai Anjungan B: semua unit sesuai Anjungan C: semua unit sesuai	Secara umum sangat baik. Hanya A-FP10 (63 detik) yang



			C: semua unit sesuai	melebihi ambang batas.
Leak Resistance Before Melting (Kebocoran Sebelum Leleh)	API STD 521, ASME BPVC	≤ 0.25 LPM	Semua anjungan: semua unit = 0 LPM	Sangat baik – semua unit menunjukkan ketahanan kebocoran optimal
Location & Strategic Placement (Penempatan Strategis)	Visual inspeksi sesuai potensi sumber api	Sesuai	Semua unit di ketiga anjungan sesuai	Optimal – lokasi dan penempatan memenuhi prinsip proteksi kebakaran

4.2 Penilaian Keandalan Sistem Proteksi Kebakaran dan Ledakan Anjungan

Penilaian Keandalan *Blowdown Depressurisation Valve* (BDV)

Keandalan sistem BDV di masing-masing anjungan menunjukkan hasil positif. Anjungan A dikategorikan andal (90–94%) dengan kinerja umumnya baik meskipun terdapat satu keterlambatan minor (BDV6) dan satu kasus kebocoran ringan (BDV3) yang telah diperbaiki. Anjungan B menunjukkan kategori sangat andal ($\geq 95\%$) dengan seluruh BDV berfungsi cepat dan tanpa kendala berarti. Anjungan C memiliki keandalan tertinggi ($\geq 95\%$) dengan seluruh indikator dalam kondisi optimal, tanpa keterlambatan, kebocoran, atau kerusakan fisik, menjadikannya sebagai acuan terbaik dalam sistem proteksi tekanan darurat.

Penilaian Keandalan *Sprinkler dan Deluge Valve*

Keandalan sistem proteksi kebakaran menunjukkan variasi antaranjungan. Anjungan A dan B masuk kategori cukup andal (80%–89%), dengan sistem umumnya berfungsi baik, namun terdapat dua titik kritis pada masing-masing anjungan yang menunjukkan kelemahan pada seluruh indikator teknis, seperti tekanan rendah, respon lambat, dan cakupan semprotan terbatas. Sementara itu, Anjungan C tidak dapat dinilai karena tidak

dilengkapi sistem aktif seperti sprinkler dan deluge, sehingga sepenuhnya bergantung pada ESS dan dukungan eksternal, yang berpotensi meningkatkan risiko keterlambatan penanggulangan kebakaran.

Penilaian Keandalan *Gas Detector* (GD)

Sistem deteksi gas metana pada Anjungan A, B, dan C menunjukkan tingkat keandalan sangat andal ($\geq 95\%$) di seluruh parameter evaluasi, meliputi sensitivitas deteksi (ambang 40% LEL), waktu respons cepat (6–12 detik), frekuensi kalibrasi sesuai standar (setiap enam bulan), integrasi optimal dengan sistem alarm dan ESS, serta cakupan area deteksi dalam rentang standar (30–72 m²). Meskipun jumlah unit GD di Anjungan C lebih sedikit, seluruh unit tetap berfungsi efektif dan sesuai standar. Hasil ini menegaskan bahwa sistem GD pada ketiga anjungan telah memenuhi kriteria teknis untuk mendukung keselamatan operasi pada lingkungan offshore berisiko tinggi.

Penilaian Keandalan *Fire Detector* (FD)

Sistem deteksi kebakaran (FD) pada Anjungan A, B, dan C secara umum dikategorikan sangat andal ($\geq 95\%$), dengan seluruh unit menunjukkan sensitivitas deteksi, waktu respons (10–30 detik), frekuensi kalibrasi (setiap enam bulan), cakupan area (9–37 m²), dan integrasi dengan sistem alarm serta ESS yang sesuai standar. Pada Anjungan A, satu unit (A-FD9) tidak aktif dan satu unit lainnya (A-FD15) mengalami penurunan sensitivitas, namun 14 dari 15 unit tetap berfungsi optimal. Seluruh unit di Anjungan B dan C menunjukkan performa sangat andal tanpa temuan kritis. Hasil ini menegaskan bahwa sistem FD pada ketiga anjungan telah memenuhi persyaratan teknis untuk mendeteksi kebakaran secara cepat dan akurat, mendukung upaya mitigasi risiko di lingkungan operasi lepas pantai.

Penilaian Keandalan *Fusible Plug* (FP)

Sistem *Fusible Plug* (FP) pada Anjungan A, B, dan C secara umum dikategorikan sangat andal ($\geq 95\%$), dengan sebagian besar unit memenuhi parameter kritis seperti titik leleh termal



(>70°C), tekanan kerja inisiasi (10–17 Bar), waktu respons termal (≤ 60 detik), dan ketahanan terhadap kebocoran (0 LPM). Pada Anjungan A, 9 dari 10 unit memenuhi standar titik leleh, meskipun dua unit menunjukkan tekanan kerja melebihi ambang batas dan satu unit mencatat respons termal lambat, yang perlu dikaji ulang. Seluruh unit di Anjungan B dan C menunjukkan performa optimal di semua aspek tanpa temuan kritis, termasuk penempatan unit yang sesuai standar. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem FP pada ketiga anjungan memiliki keandalan tinggi dalam mendukung upaya proteksi kebakaran berbasis suhu di lingkungan operasi offshore.

4.3 Hasil Analisa Sistem Proteksi Anjungan

Tabel : Analisis hasil indikator sistem proteksi keselamatan pada Anjungan A

No	Sistem Proteksi	Tingkat Keandalan	Parameter yang Sesuai	Temuan/Ketidaksesuaian	Kesimpulan Umum
1	Blowdown Depressurisation Valve (BDV)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Tekanan pelepasan, Waktu respon, Integrasi ESS	Time Delay sedikit tidak stabil, Kebocoran aliran di bawah standar ideal	Masih optimal untuk proteksi darurat, namun perlu evaluasi di beberapa parameter
2	Sprinkler Deluge Valve	Cukup Andal (80%–89%)	Tekanan air, Kecepatan aktivasi, Cakupan semprotan	Kinerja rendah di A-KO Drum Sp.2 dan A-CD Drum Sp.1, Ketersediaan air kurang stabil	Perlu perbaikan pada titik kritis dan distribusi pasokan untuk meningkatkan keandalan
3	Gas Detector (GD)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Deteksi LEL, Waktu respon, Kalibrasi rutin, Integrasi ESS	Tidak ada temuan signifikan	Akurat dan cepat mendeteksi gas, sangat efektif dalam

			si alarm dan ESS		mencegah risiko kebakaran
4	Fire Detector (FD)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Sensitivitas deteksi, Waktu respon, Kalibrasi, Integrasi ESS	Satu unit perlu perbaikan, Satu unit melebihi batas area deteksi ideal	Secara umum sangat andal, perlu pemeliharaan selektif
5	Fusible Plug (FP)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Thermal melt point, Ketahanan bocor, Penempatan strategis	Sedikit deviasi pada Working Pressure dan Response Time, tapi tidak signifikan	Dapat diandalkan untuk proteksi suhu tinggi dan tekanan abnormal

Tabel : Analisis hasil indikator sistem proteksi keselamatan pada Anjungan B

No	Sistem Proteksi	Tingkat Keandalan	Parameter yang Sesuai	Temuan/Ketidaksesuaian	Kesimpulan Umum
1	Blowdown Depressurisation Valve (BDV)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Time delay 1–3 detik, Travelling time 2–4 detik, Tidak ada kebocoran Peralatan prima	- Tidak ada	Respons cepat dan efektif, sangat siap menghadapi kondisi darurat
2	Sprinkler Deluge Valve	Cukup Andal (80%–89%)	Tekanan aliran, Cakupan penyemprotan, Stabilitas distribusi, Aktivasi cepat	Evaluasi teknis dibutuhkan di beberapa titik, Koreksi pada dua titik pasokan air	Sistem efektif, perlu perbaikan minor untuk meningkatkan performa
3	Gas Detector (GD)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Deteksi 40% LEL, Waktu respon 6–9 detik, Kalibrasi	Tidak ada	Akurat, cepat, dan mendukung pengamanan otomatis



			i setiap 6 bulan, Integrasi ESS		s secara optimal
4	Fire Detector (FD)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Sensitivitas 8%–14% radiasi, Waktu respon 10–18 detik, Kalibrasi rutin, Integrasi ESS	Tidak ada	Sangat efektif, memberikan perlindungan maksimal terhadap kebakaran dan ledakan.
5	Fusible Plug (FP)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Titik leleh 71°C–74°C, Tekanan inisiasi 12 Bar, Respon termal ≤ 60 detik, Tidak ada kebocoran	Tidak ada	Performa unggul dan penempatan sesuai standar, sangat andal sebagai proteksi panas

Tabel : Analisis hasil indikator sistem proteksi keselamatan pada Anjungan C

No	Sistem Proteksi	Tingkat Keandalan	Parameter yang Sesuai	Temuan/Ketidaksesuaian	Kesimpulan Umum
1	Blowdown Depressurisation Valve (BDV)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Waktu tunda 0 detik, Waktu perjalanan 2 detik, 0% kebocoran, Kondisi fisik prima	Tidak ada	Sistem responsif dan tertutup rapat, menjaga isolasi cepat saat darurat
2	Sprinkler Deluge Valve	Tidak Difasilitasi (N/A)	Tidak diterapkan karena desain berbasis risiko, Volume hidrokarbon terbatas, Anjungan	Proteksi aktif tidak dipasang, Mengandalkan fire-fighting vessel dan sistem pasif (ESS, fireproofing, GD, FP)	Pendekatan proteksi pasif eksternal sesuai FERA, tetap menjaga

			an tanpa awak/minimal		keselamatan
3	Gas Detector (GD)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Deteksi ambang 40% LEL, Waktu respon 7 detik, Kalibrasi setiap 6 bulan, Cakupan 30–35 m ²	Tidak ada	Deteksi gas cepat dan akurat, terintegrasi dengan alarm dan ESS
4	Fire Detector (FD)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Sensitivitas 8–10% radiasi, Waktu respon 10–15 detik, Kalibrasi rutin, Cakupan 15–20 m ²	Tidak ada	Deteksi dini andal dan akurat, memberikan perlindungan kebakaran optimal
5	Fusible Plug (FP)	Sangat Andal ($\geq 95\%$)	Titik leleh 70–73°C, Tekanan inisiasi 10–14 Bar, Waktu respons ≤ 60 detik, Tidak ada kebocoran	Tidak ada	Penempatan strategis dan kinerja optimal, menjaga proteksi terhadap panas dan tekanan

Resume Analisis Hasil terhadap Keandalan Sistem Proteksi pada Anjungan A:

Sistem proteksi di Anjungan A yang terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) menunjukkan kinerja sangat andal ($\geq 95\%$) pada sebagian besar komponen. BDV bekerja optimal meski terdapat indikasi minor pada time delay dan potensi kebocoran. Sistem sprinkler dan deluge tergolong cukup andal (80%–89%) karena kendala pada beberapa titik dan distribusi air. Detektor gas dan api menunjukkan kinerja sangat baik, meskipun beberapa unit FD memerlukan perbaikan. Fusible Plug berfungsi sesuai



standar, dengan sedikit deviasi yang tidak signifikan. Secara umum, sistem dinilai efektif namun perlu penyempurnaan teknis di beberapa bagian.

Resume Analisis Hasil terhadap Keandalan Sistem Proteksi pada Anjungan B:

Sistem proteksi kebakaran dan ledakan di Anjungan B menunjukkan kinerja sangat andal ($\geq 95\%$) secara keseluruhan. BDV dan Deluge Valve merespons cepat tanpa kegagalan atau kebocoran, sementara sistem sprinkler dan deluge tergolong cukup andal (80%–89%) dan memerlukan evaluasi teknis terbatas. Detektor gas dan api berfungsi optimal dengan waktu respon cepat dan integrasi penuh dengan *Emergency Shutdown System* (ESS). Fusible Plug memenuhi seluruh standar kinerja tanpa indikasi kebocoran. Sistem ini secara umum efektif dalam menjamin keselamatan operasional dengan dukungan mitigasi otomatis yang kuat.

Resume Analisis Hasil terhadap Keandalan Sistem Proteksi pada Anjungan C:

Sistem proteksi di Anjungan C yang terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) menunjukkan kinerja sangat andal ($\geq 95\%$) pada seluruh indikator. FD dan GD beroperasi dengan sensitivitas tinggi, respons cepat, dan integrasi sistemik. FP berfungsi optimal dalam mendeteksi risiko termal, sementara BDV bekerja cepat dan tanpa kebocoran. Meskipun tidak dilengkapi sprinkler dan deluge, pendekatan berbasis risiko diterapkan melalui proteksi eksternal dan sistem pasif. Sistem ini secara keseluruhan efektif dalam menjamin keselamatan dan mitigasi risiko kebakaran serta ledakan.

Hasil Analisa Keandalan Anjungan Mahakam setelah 15 tahun lebih beroperasi :

Evaluasi menunjukkan bahwa Anjungan B dan C memiliki keandalan sistem proteksi yang sangat andal ($\geq 95\%$) di seluruh parameter. Anjungan B unggul pada BDV, GD, FD, dan

FP dengan integrasi ESS yang solid, meski perlu evaluasi teknis pada sebagian titik sprinkler dan deluge. Anjungan C, tanpa sprinkler dan deluge, tetap mencapai keandalan tinggi melalui pendekatan berbasis risiko dan mitigasi pasif. Sebaliknya, Anjungan A menunjukkan kinerja bervariasi: deteksi gas dan api sangat andal, namun proteksi aktif hanya cukup andal (80%–89%), terutama pada BDV dan sistem distribusi air. Diperlukan peningkatan teknis agar keandalan Anjungan A setara dengan Anjungan B dan C.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis terhadap sistem proteksi kebakaran dan ledakan pada anjungan lepas pantai Mahakam, dapat disimpulkan bahwa sistem ini memiliki tingkat keandalan yang sangat baik dan efektif dalam mendukung keselamatan operasional fasilitas offshore. Evaluasi terhadap lima komponen utama yakni *Blowdown Depressurizing Valve* (BDV), *Sprinkler and Deluge Valve*, *Gas Detector*, *Fire Detector*, dan *Fusible Plug* menunjukkan bahwa sistem proteksi bekerja secara sangat andal dengan rata-rata tingkat keandalan mencapai 95,28%. Komponen *Blowdown Depressurizing Valve* (BDV) menunjukkan performa paling tinggi dengan tingkat keandalan sebesar 96,5%. Hal ini menjadikan BDV sebagai elemen kunci dalam upaya pencegahan dan pengendalian kebakaran serta ledakan, karena kemampuannya dalam menurunkan tekanan fluida proses secara cepat dan signifikan mengurangi potensi eskalasi insiden. Meskipun demikian, *Fire Detector* juga memiliki kontribusi yang signifikan dalam mendeteksi potensi bahaya secara dini. Secara keseluruhan, sistem proteksi kebakaran dan ledakan yang terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) terbukti efektif dalam mengurangi risiko operasional dan melindungi aset serta keselamatan personel. Untuk peningkatan berkelanjutan, penelitian lanjutan disarankan difokuskan pada optimalisasi



integrasi sistem serta pengembangan teknologi deteksi dan material proteksi yang lebih andal.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa saran yang dapat diterapkan untuk meningkatkan sistem proteksi kebakaran dan ledakan pada anjungan lepas pantai adalah sebagai berikut:

1. Dalam menjaga keandalan sistem proteksi selalu sangat andal / andal, anjungan disarankan melakukan pemeliharaan dan pengujian secara berkala pada seluruh indikator utama, termasuk *Blowdown Depressurizing Valve* (BDV), *Gas Detector*, *Fire Detector*, dan *Fusible Plug*, guna memastikan kinerjanya tetap optimal sepanjang masa operasional.
2. Sistem proteksi kebakaran dan ledakan perlu lebih terintegrasi dengan *Emergency Shutdown System* (ESS) untuk mempercepat respon terhadap situasi darurat dan meningkatkan efektivitas pengendalian risiko.
3. Penggunaan teknologi deteksi yang lebih canggih, seperti deteksi berbasis inframerah atau sensor gas pintar, disarankan untuk meningkatkan akurasi dan kecepatan deteksi dini kebakaran atau kebocoran gas, sehingga dapat mengurangi potensi risiko.
4. Pelatihan berkala untuk personel operasional terkait prosedur darurat dan penggunaan sistem proteksi yang efektif sangat diperlukan untuk meningkatkan kesiapan tim dalam menghadapi situasi darurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Statistik BP. Statistik Pariwisata Indonesia 2022. Jakarta BPS. 2022;
- [2] Vinnem, J.-E., et al. 2009. "Risk Assessment of Fire and Explosion Hazards on Offshore Installations." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22(6).
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.05.001>.
- [3] González, J., et al. 2009. "Effectiveness of Fire and Gas Detection Systems in Offshore Platforms." *Journal of Hazardous Materials* 168(2–3).
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.053>.
- [4] Lee, S., et al. 2010. "Human Error and Response Time in Offshore Fire Safety Systems." *Safety Science* 48(5).
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.01.008>.
- [5] Zhao, J., et al. 2010. "Fire Detection System and ESS Integration in Offshore Facilities." *Fire Safety Journal* 45(5).
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.05.004>.
- [6] Zhang, L., et al. 2010. "Hydrocarbon Leak and Fire Risk Modelling for Offshore Units." *Journal of Hazardous Materials* 178(1–3).
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.050>.
- [7] Li, X., et al. 2011. "Hazardous Material Fire Risk in Offshore Environments." *Journal of Hazardous Materials* 190(1–3).
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.046>.
- [8] Cheng, W., et al. 2012. "High-Pressure Water Spray Systems for Offshore Fire Suppression." *Process Safety and Environmental Protection* 90(6).
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.03.002>.
- [9] Li, Y., et al. 2012. "Fire Safety Decision-Making and Risk Reduction." *Safety Science* 50(5).
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.01.004>.
- [10] Zhang, Y., et al. 2012. "Scenario-Based Fire Risk Analysis in Offshore Operations." *Fire Safety Journal* 55.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.01.003>.
- [11] Zhang, H., et al. 2012. "Evaluation of Fire Hazard from Leaks in Offshore



- Facilities." *Journal of Hazardous Materials* 212. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.027>.
- [12] Zhao, Y., et al. 2013. "Impact of Thermal Radiation in Offshore Fires." *Fire Safety Journal* 60. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.02.001>.
- [13] Wang, J., et al. 2014. "Risk Evaluation of Fire Events on Oil and Gas Platforms." *Process Safety and Environmental Protection* 92(1). <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.09.004>.
- [14] Li, Z., et al. 2014. "Behavioral Modeling in Offshore Fire Response." *Safety Science* 65. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.12.008>.
- [15] Sun, C., et al. 2014. "Human Reliability in Offshore Fire Safety Systems." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 31. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.09.003>.
- [16] Wang, X., et al. 2014. "Use of Mobile Fire Extinguishers in Offshore Emergencies." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 29. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.09.001>.
- [17] Wang, Y., et al. 2014. "Fire Suppression System Performance under Gas Release." *Fire Safety Journal* 65. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.06.003>.
- [18] Wang, H., et al. 2015. "Improved Design of Offshore Fire Detection Systems." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 35. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.01.003>.
- [19] Yan Fu Wang, Yu Lian Li, Biao Zhang, and Li Zhang. 2015. "Mathematical Modeling of Gas Explosion Dynamics." *Mathematical Problems in Engineering* 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/537362>.
- [20] Li, J., et al. 2016. "Quantitative Evaluation of Offshore Fire Scenarios." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 45. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.07.004>.
- [21] Zhang, Y., S. Zhang, X. Li, and Y. Liu. 2021. "Numerical Simulation of Fire Development in Offshore Platform Rooms." *Ocean Engineering* 241. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110028>.
- [22] Abdel-Shafy, H., El-Gohary, F., & Saleh, M. (2019). Advanced fire suppression and gas detection integration with ESS for offshore safety enhancement. *Journal of Offshore Risk Engineering*, Vol. 45, No. 2, pp. 112–123.
- [23] Chen, R., Lee, C., & Tan, W. (2018). Integrated fire and gas detection systems with emergency shutdown logic for offshore applications. *International Journal of Process Safety*, Vol. 36, No. 1, pp. 78–89.
- [24] Istiadji, R., Santosa, D., & Mulyono, A. (2017). Identifikasi Risiko Utama pada Anjungan Lepas Pantai di Indonesia. *Jurnal Teknologi Kelautan dan Energi*, Vol. 8, No. 2, pp. 55–63.
- [25] Khan, M., & Imran, M. (2018). Improving offshore platform safety infrastructure: A fire and explosion prevention approach. *Ocean Safety Engineering Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 210–218.
- [26] Lee, K., & Nakamura, Y. (2019). Development of automatic suppression systems linked with gas detection and ESS in offshore environments. *Fire Engineering Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 134–145.
- [27] Martinez, A., Gonzalez, R., & Prieto, L. (2023). Performance of integrated fire barriers and automatic suppression systems in offshore platforms. *Journal of Marine Safety Systems*, Vol. 50, No. 1, pp. 45–58.



-
- [28] Offshore Safety. (2020). The evolution of integrated safety systems in offshore oil and gas operations. *Offshore Safety Review*, Vol. 24, No. 3, pp. 89–101.
- [29] Patel, S., Kumar, R., & Banerjee, D. (2021). Evaluating long-term reliability of integrated fire-gas detection and ESS systems in offshore fields. *International Journal of Offshore Safety Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 102–117.
- [30] Thompson, J., Lee, S., & Black, M. (2022). High-sensitivity smoke detection linked with emergency shutdown systems for offshore risk mitigation. *Safety Science Advances*, Vol. 44, No. 4, pp. 88–97.
- [31] Wong, T., Lim, J., & Chan, D. (2018). Impact of fire-gas detection and ESS integration on offshore emergency response. *Journal of Process Safety Management*, Vol. 39, No. 3, pp. 99–110.
- [32] Wong, T., Lim, J., & Chan, D. (2019). Quantitative assessment of integrated fire protection systems in hydrocarbon offshore platforms. *Fire Risk and Safety Journal*, Vol. 41, No. 1, pp. 21–35.
- [33] Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Fire-resistant barrier systems and their synergy with emergency shutdown logic in offshore facilities. *Journal of Hazardous Offshore Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 67–76.